



TITLE:

成層圏突然昇温予測への衛星データ同化のインパクト

AUTHOR(S):

野口, 峻佑; 黒田, 友二; 向川, 均; 水田, 亮; 小林, ちあき

CITATION:

野口, 峻佑 ...[et al]. 成層圏突然昇温予測への衛星データ同化のインパクト. 平成30年度「異常気象と長期変動」研究集会報告 2019: 112-119

ISSUE DATE:

2019-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/240950>

RIGHT:

成層圏突然昇温予測への衛星データ同化のインパクト

野口 峻佑¹・黒田 友二²・向川 均³・水田 亮¹・小林 ちあき¹

(1: 気象研究所 気候研究部, 2: 気象大学校, 3: 京都大学 理学研究科)

1. はじめに

大気循環変動を把握・予測するにあたり、数値天気予報 (NWP) システムにより作成される解析値・予報値が、その際の入力として用いられる各種観測からどの程度の影響を受けているかを把握しておくことは重要である。特定の観測が解析値・予報値に及ぼすインパクトの評価のために、対象となる観測データを追加もしくは除去した同化・予報実験を行い、結果の比較による直接的な評価を行う「観測システム実験」(e.g. Boutier and Kelly 2001; Zapotocny *et al.* 2007) や、(主に線形等の仮定を置いて) 観測インパクトの診断・推定を行う「感度解析」(e.g. Langland and Baker 2004; Kalnay *et al.* 2012; Ota *et al.* 2013) 等が、これまでに数多く行われてきている。しかしながら、そのような観測インパクトの調査は、自前の NWP システムの保持等を必要とする、比較的門戸の狭いものであり、また計算機資源の制約等により、調査にあたっての対象事例も限定されることが多い。

ところで、同一設定の NWP システムによる長期にわたる解析値である再解析データは、気候変動の解析に限らず重要な研究資料であり、世界の各現業機関において精力的に作成・配布がなされている。その中で、気象庁による長期再解析 JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015) を、他の再解析と比べた際の特徴として、それがサブプロダクト (JRA-55C, JRA-55AMIP) とともに「JRA-55 ファミリー」として提供されている点が挙げられる。特に、(衛星観測システムの変遷による人為的なトレンドを取り除く為に) 同化するデータを従来型観測 (各種地上・海上観測、ゾンデによる高層観測、航空機観測等) に限定した JRA-55C (Kobayashi *et al.* 2014) は、気候変化や長周期変動の解析という本来の用途以外にも、JRA-55 との比較によって衛星観測のインパクト調査 (すなわち、観測システム実験的な用途) に用いることができる。

実際、この JRA-55 と JRA-55C との比較による衛星観測データ同化のインパクト評価が、成層圏突然昇温 (SSW) 等の顕著現象を対象として、これまでに行われている。例えば、Noguchi and Kobayashi (2018) は、高層観測の疎な南半球において、観測史上唯一の SSW (およびその顕著な特徴であった極渦分裂) の再現に JRA-55C は失敗していることを報告している。そこでは特に、解析インクリメント (観測データの同化による修正量) を調べることによ

って、衛星観測によるモデル上端付近での修正の有無により生じた、上空の極夜ジェット構造の差異が惑星規模波の伝播特性に影響を及ぼすことで、分裂挙動の再現性の違いが引き起こされている可能性が示唆された。その一方で、高層観測の比較的豊富な北半球における SSW については、その再現性はそれほど損なわれていない。JRA-55C において、SSW の生起日に数日の遅れや、生起が明瞭でない事例については見逃しが生じることはあるものの、その差異の大きさとしては軽微 (SSW 時にとりわけ大きいわけではない) であり (Taguchi 2017)、従来型観測のみでも SSW を含む成層圏-対流圏の環状モード変動は、(上部成層圏を除き) よく捉えられている (Gerber and Martineau 2018) との報告がなされている。

上記により、北半球 SSW への衛星観測のインパクトは小さいという印象を持つかもしれないが、それはあくまで解析値の段階での話であることに注意が必要である。Noguchi and Kobayashi (2018) による示唆や、SSW の生起・発達が、対流圏からの波強制のみならず、成層圏循環場構造の詳細にも大きく依存することが近年指摘されている (e.g. Noguchi *et al.* 2016; de la Cámara *et al.* 2017) ことを踏まえると、その予測の段階において衛星観測の影響が顕在化することが予期できる。なお、JRA-55 と JRA-55C におけるモデル上端付近の差異は、NWP モデルにおける重力波抵抗パラメタリゼーションの不完全性やスポンジ層内において抑制されてしまった変動の影響を反映していると考えられる。近年、SSW 前のプレコンディショニング時における重力波の寄与が示唆されている (Albers and Birner 2014; Sheffler *et al.* 2018) が、衛星観測によって補填されたそのような変動 (e.g. 重力波による基本場への作用) の影響が、SSW の時間発展において果たす役割の検証が望まれる。

そこで本研究では、JRA-55 および JRA-55C を初期値とするアンサンブル再予報実験を実施し、その結果を比較することで、衛星観測データの同化が SSW の予報に与えるインパクトを明示する。それにあたり、衛星観測の本格化した 1979 年以降 (1979 年から JRA-55C の提供期間に含まれる 2012 年まで) の冬季 (12 月から 2 月まで) に生起した、複数の SSW に対する再予報実験を実施する。対象は Charlton and Polvani (2007) の定義に従い抽出した SSW 20 事例であり、北緯 60 度 10 hPa における帯状平均東西風の逆転日を SSW 生起日とする。

2. 実験設定

再予報実験には、気象研究所の大気大循環モデル (MRI-AGCM, e.g. Mizuta *et al.* 2012) を, Noguchi *et al.* (2016) や Mukougawa *et al.* (2017) と同様の設定で用いた. 水平解像度は T_L159 (格子間隔は約 110 km), モデル上端は 0.1 hPa, 鉛直層数は 60 層である. この設定は、鉛直解像度は JRA-55 作成時の気象庁全球スペクトルモデル (JMA-GSM) と同様であるが、水平解像度は (T_L319 : 約 55 km と比べ) 一段階落としたものとなっている. そのために再解析作成時の JMA-GSM の解像度とは若干の不整合性があるが、代わりに、この設定は SSW に対する NWP システム相互比較へのデータ提供時と同様の設定であるため、他のシステムとの相対的な予報成績評価の実績を有する (Tripathi *et al.* 2016). なお、外部境界データとしては、気象庁の 1 ヶ月予報と同様に、オゾン は 帯状平均気候値、海面水温は初期時刻の偏差を時間変化する気候値に加えた値を与えている.

アンサンブル予報実施の為の摂動を含む初期値は、気象研究所アンサンブル予報システム (MRI-EPS, Yabu *et al.* 2014) により作成した. このシステムは、成長モード育成 (BGM) 法 (Toth and Kalnay 1993) による旧気象庁現業 1 ヶ月予報システムの気象研究所スーパーコンピュータへの移植・拡張版であるが、本研究で用いるにあたっては、更に成層圏における摂動成長に対する拘束を緩和する等の若干の修正が加えられている. ここでは、MRI-EPS により作成した 12 モードの摂動を、符号を加味して、解析値として用意した JRA-55 (および JRA-55C) に付け加えることにより、各初期時刻に 25 個の初期値 (コントロールメンバー 1 個、摂動メンバー 24 個) を用意した. なお、解析値の差異による純粋な影響をみるために、同一の摂動 (JRA-55 を基準場として育成) を用いた.

予報の実施の仕方は、以下の 2 通りである. まず、JRA-55 を基準とした予報を、各 SSW 生起日 (D 0 と表記) の 15 日前 (D-15) から 5 日後 (D+5) までの期間について毎日 (i.e. 21 初期日分) 実施し、予報成績の概観を行った. ついで、JRA-55C を基準とした予報を、5 日おきに 5 初期分 (D-15, -10, -5, 0, +5) 実施し、これらを JRA-55 から開始した予報と比較することにより、衛星観測データの同化インパクトの定量化を図った. 各予報の積分期間は 60 日であり、毎日 12 UTC を開始時刻とした.

3. 解析結果

3-1. 捕捉率への影響

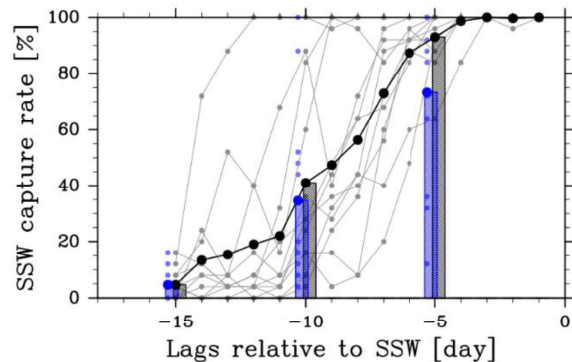


図 1. SSW の捕捉率. 実際の SSW 生起日を基準に、前後 3 日の期間中に、東西風の逆転を再現したアンサンブルメンバーの割合を % で表示. 東風への逆転が明瞭であった SSW 12 事例について、D-15 から D-1 に開始した JRA-55 からの予報の結果を灰色の丸印・線で示す. また、12 事例の平均を黒色の丸印・線で示す. D-15, -10, -5 については灰色の棒でも表示し、併せて JRA-55C からの予報の結果を青色の丸印・棒で同様に示す.

まず、SSW の生起判定における衛星観測のインパクトを定量化するために、各アンサンブル予報における SSW の捕捉率を調べた. ここでは、SSW が正しいタイミングで再現できることを捕捉とし、大昇温の判定基準である北緯 60 度、10 hPa における帯状平均東西風の逆転を、実際の逆転日を基準に前後 3 日の期間中に、予測したメンバーの割合を計算した. 図 1 に、JRA-55 からの予報について、各 SSW の捕捉率を開始日毎に計算した結果を灰線で、その平均を黒線で、% にて示す. なお、東西風がころうじて逆転するような不明瞭な SSW 事例に対しては、この二項分類的な判定は適さないため、ここでは、SSW 生起後 5 日間のうちに東西風が -10 m s^{-1} を下回った、明瞭な 12 事例に対する結果を示す.

この図より、SSW 生起を決定論的に予測できるようになる (すなわち、ほぼ全てのアンサンブルメンバーで予測できるようになる) タイミングは、平均としては SSW 生起の約 5 日前 (D-5) であることがわかる. それ以前になると、捕捉率は急速に低下 (e.g. D-10 では 50% 以下) し、2 週間以上前からは 20% を下回ってしまう. ただし、事例によっては、10 日以上前から全メンバーで捕捉できている場合もあり、1 週間以上からの捕捉率は事例依存性が非常に大きいと言える. なお、以上の描像は、現業予報データに対して同様の解析を行っている、Taguchi (2016) や Karpechko (2018) の結果と整合的である.

図 1 にはまた、JRA-55C からの予報についての結果も青色の丸印・棒で示しており、青棒と灰棒 (JRA-55 からの結果) との比較により、SSW 捕捉率への衛星観測のインパクトをみることができる。両予報結果の顕著な差として、D-5 を開始日とする JRA-55C からの予報において、約 20% もの SSW 捕捉率の低下があることがわかる。再解析値時点での JRA-55C における対象 SSW 事例は、前後 3 日の生起日のずれを許容する今回の定義においては全て捕捉されていることになるため (cf. Taguchi 2017)、この捕捉率の差は予報において顕在化したと言える。なお、それ以前の予報においては明瞭な差は生じておらず (せいぜい D-10 開始の予報において約 6%)、衛星観測のインパクトを見出すのは困難となっている。この予報期間においては、誤差は既に非線形成長の段階に入っており、衛星観測の有無による成層圏以高での初期値の差異の影響は (ここで用いた指標の観点では) それに埋没してしまっていると考えられる。

3-2. 昇温後の循環偏差への影響

次に、より一般的な予報成績指標を用いて、SSW 生起およびその後の循環場の予報への、衛星観測のインパクトを調べた。まずは SSW 前後の予報における予報成績を概観するために、北半球 (北緯 20 度以北) における高度場のアノマリー相関係数の時間高度断面を図 2 (左) に示す。JRA-55 より開始した予報における、全 SSW 20 事例についての合成結果である。一般に、この指標において予報として価値があると判断されるのは相関係数が 0.6 以上の場合である。その観点では、およそ 100 hPa 以下の対流圏における (実際の) 予測可能期間は、7-9 日程度であることがわかる。この値は、気象庁現業 1 ヶ月アンサンブル予報データに対して同様の統計解析を行った結果 (e.g. Ichimaru *et al.* 2016) と概ね等しい。それに対し、成層圏における予測可能期間は概して長く、特に SSW 後の中部成層圏においては、25-27 日程度と 3 週間を上回る様子を確認できる (図 2c-e)。なお、この傾向は前節の東西風逆転が明瞭な事例等に限定することでより明瞭となる (図示せず)。ただし、この高い予報成績は SSW 生起の予測成否に依存しており、SSW をほぼ捕捉できなかった D-15 開始の予報においては、D0 以降に急速に予報成績が落ちていくこともわかる (図 2a)。このような SSW 捕捉後に獲得できる成層圏循環の高い予測成績の持続こそが、対流圏の中長期予報の予測可能性の源として期待されているものであり、実際に SSW 後に開始した予報 (e.g. 図 2e) における 2 週目以降の対流圏の予報

成績が、SSW 前のそれ (e.g. 図 2a) と比べ、向上している様子も確認できる。

図 2 (右) には、予報成績への衛星観測データの同化インパクトとして、上記の JRA-55C より開始した予報の結果からの偏差を示す。ここで、(JRA-55 予報の JRA-55C 予報と比べての) 予報成績の改善を赤色、悪化を青色で示し、それが統計的に有意 (Welch の *t*-検定で 95% 以上) と判定される領域については網掛けして表示する。この図からはまず、概ね赤色が優勢であり、衛星観測による予報成績へのポジティブな影響を (再) 確認することができる。両予報セット間の差は、特に上部成層圏で顕著であり、SSW 前の期間における予報開始直後には、15% 以上の改善を確認できる。しかしながら、そのような予報の改善が有意と判定されるのは、開始直後のせいぜい 5-10 日程度の期間であることもみてとれる。これは、予報開始時の解析値の差が (観測による修正を受けることなく) 線形に成長し、[良い (/悪い) 初期値 - 良い (/悪い) 予報] の対応関係が保たれるのが、その程度の期間であることを反映しているものと考えられる。なお、ここで D-5 に開始した予報では SSW 生起日が予報成績差の有意な期間に含まれている (図 2h) が、このことは、前節で D-5 に開始した予報においてのみ、SSW の捕捉率に 20% 程の顕著な差異が示されたことと整合的である。ただし、(一応、7 日程度の予報期間で対流圏での差異は生じているが、) 中長期予報へのインパクトという観点では、この開始日での改善を認めることはできず、帯状平均東西風の逆転という大昇温の判定基準と (中長期予報で期待される) SSW 後の成層圏における持続性の高い循環偏差の形成とは、必ずしも強く結び付いたものではないこともわかる。

中長期予報へのポジティブなインパクトは、SSW 後の成層圏-対流圏結合変動がほぼ再現できている D-5 以降の開始日より、D-15 や D-10 のような SSW 生起を捕捉できるか否かと関わる開始日において、大きくなるものと推察できる。実際、比較的大きな予報成績の改善領域が、D-15 および D-10 開始の予報における SSW 後の成層圏において、斑な分布であり一概に統計的に有意とは言えないが、存在していることを確認できる。このことは、いくつかの SSW 事例においてのみではあるが、初期に存在した上部成層圏以高の差異が、(その後の非線形な波-平均流相互作用を介して) 下部成層圏にまで及び、そこで持続するような差異へと大きく発達する場合があることを示唆する。すなわち、中長期予報成績にまで及ぶような衛星観測のインパクトが生じるかは、事例に依るところが大きいと言える。

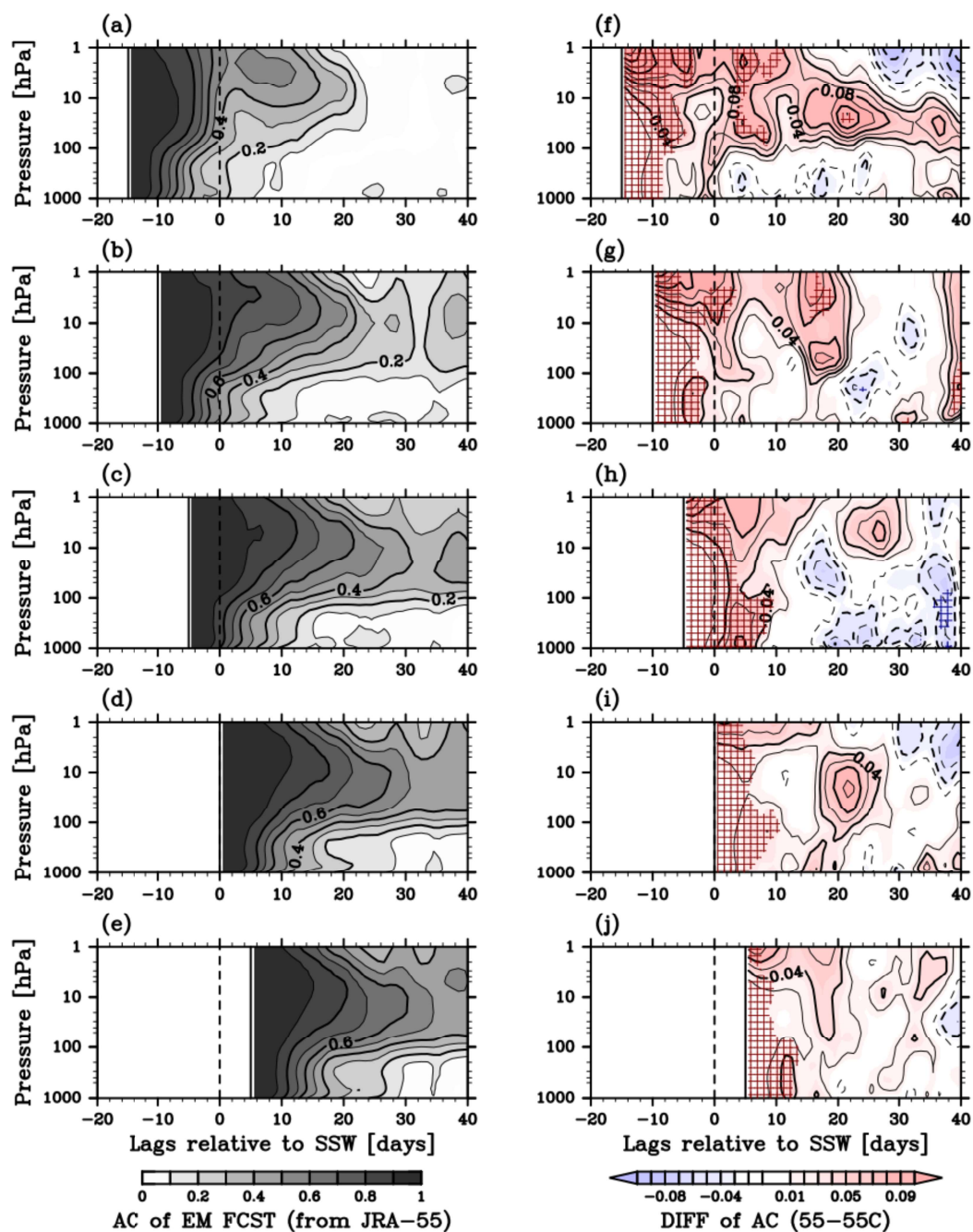


図 2. 予報成績の時間-高度断面図. アンサンブル平均予測場における北緯 20 度以北の高度場のアノマリー相関係数 (対 JRA-55) を, 上段から順に D-15, -10, -5, 0, +5 からの予報結果について表示. 縦破線で D0 を示す. 左列: JRA-55 開始予報の成績について, SSW 20 事例の平均を表示. 右列: 上記の, JRA-55C 開始予報の成績からの偏差を表示. 差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 95% 以上) と判定される領域を網掛けで示す.

3-3. 顕著事例における影響の詳細

そこで最後に、中長期予報結果への衛星観測のインパクトが特に顕著であった事例について、上述のような初期誤差発達過程の確認を行った。ここでは、SSW 直後 1 ヶ月の期間における規格化高度場偏差 (i.e. 北半球環状モード偏差の簡便な指標, Baldwin and Thompson 2009) について、両予報セット間の差を吟味し (図 3), 下部成層圏で最も大きなインパクトが生じていた, 1985 年 1 月 1 日に生じた SSW に対して D-10 (1984 年 12 月 22 日) から開始した予報 (図 3 の赤十字点) に着目した。なお, この予報事例では, 地表にまで及ぶ顕著な差異が, SSW 後 1 ヶ月以上の予報期間にわたって生じていた (図示せず)。

この予報事例における結果の概観を図 4 に示す。成層圏 (30 hPa) における極域 (北緯 70 度以北での領域平均) 温度について, 両再解析値 (JRA-55: 赤色, JRA-55C: 青色) およびそこからのアンサンブル平均予報値 (メンバー間標準偏差の半値情報付き) を, それぞれ破線および太実線で示す (図 4a)。JRA-55 およびそこからの予報においては, 1 月上旬をピークとする 25 K 以上の昇温がみられ, SSW の発生をアンサンブル予報はよく捉えられている様子を確認できる。また, 衛星観測データを同化しない JRA-55C においても (昇温ピーク値に 5 K 程の差は生じてしまっているが) この時間発展はよく再現されている。しかし, JRA-55C からの予報については, 12 月 26 日 (D-6) 以降, 上記の時間発展から乖離してしまい, アンサンブル平均としての昇温は 10 K 程度に留まっている。

両予報間の差が決定的となった 12 月 29 日 (D-3) における成層圏周極渦の形態を確認すると, 予測された成層圏循環場の違いは明瞭である。ここでは Matthewman *et al.* (2009) に従い, 鉛直方向に規格化した渦位の 38 PVU 等値線を重ねて 3 次元的に表示した。JRA-55 から開始した予報においては, 下部成層圏までほぼ順圧的に極渦の分裂が生じているのに対し, JRA-55C から開始した予報においては, 北米-ユーラシア大陸方向に引き延ばされた極渦が単一のまま持ち堪えてしまっている。つまり, JRA-55C からの予報では, このように極渦分裂の再現に失敗してしまった結果, その後の 1 ヶ月以上の期間における下部成層圏 (および対流圏) の予報値が, JRA-55 からのそれとは大きく異なっていた。

再解析の段階では同様の時間発展を示せていたにもかかわらず, 予報の段階では上記のように大きく異なる循環場状態へと至ってしまった最初のきっかけをみるために, 予報開始直後の波-平均流相互作用の様子を図 5 に示す。帯状平均東西風と E-P フラ

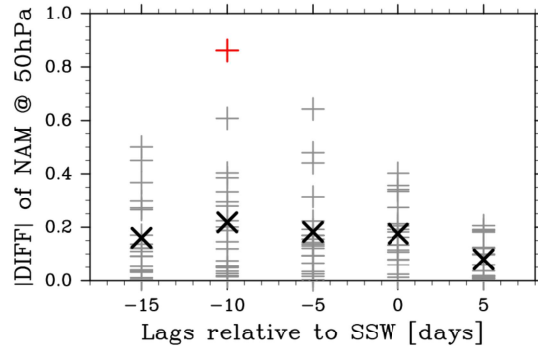


図 3. SSW 後の下部成層圏循環場の予報への衛星観測のインパクト。各 SSW での, D+5 から D+35 で期間平均した, 50 hPa における極域 (北緯 60 度以北) 規格化高度場偏差について, JRA-55 と JRA-55C から開始した予報 (アンサンブル平均) の差の絶対値を, 予報開始日毎に, 灰色の十字点で示す。各予報開始日での SSW 20 事例の平均を太×印で示す。図 4 および図 5 にて着目した事例を赤色で着色。

ックス (Andrews *et al.* 1987) およびその収束発散の, JRA-55 および JRA-55C からのアンサンブル平均予報結果について, 予報開始 1-3 日目の, 12 月 23 日 (D-9) から 25 日 (D-7) までの 3 日平均場と, その差を並べた。この期間は, 対流圏から成層圏へと上方伝播する波活動度が急増した時期であり, JRA-55 からの予報においては, 北緯 50-60 度の 1 hPa 付近の領域にて顕著なフラックスの収束がみられる (図 5a)。これは上部成層圏での顕著な (波数 2 の) 波成分の増幅 (すなわち分裂挙動) の開始として解釈できる。それに対し, JRA-55C からの予報においては, 伝播してきた波活動度が赤道側へと逸れて, 上述のフラックス収束の形成に失敗してしまい, 北緯 30-40 度に弱い収束を形成するのに留まっている (図 5b)。この原因は, 初期値 (JRA-55C) における (JRA-55 においては衛星観測データの同化によって修正されている, モデル上端付近での極夜ジェットの強風バイアスを反映した) 強過ぎる西風基本場であり, これにより波の伝播特性が変わってしまっていることを両予報セット間の有意な差 (図 5c) としても確認できる。なお, この時期の対流圏からの波活動度の伝播量には差がほとんどないため, 差異は上部成層圏で高から始まっていると言える。ただし, この時期の上端付近の差異は, 他事例と比べてもとりわけ大きなものであったため, 解析インクリメントの変動要因に関して更なる調査が必要である。

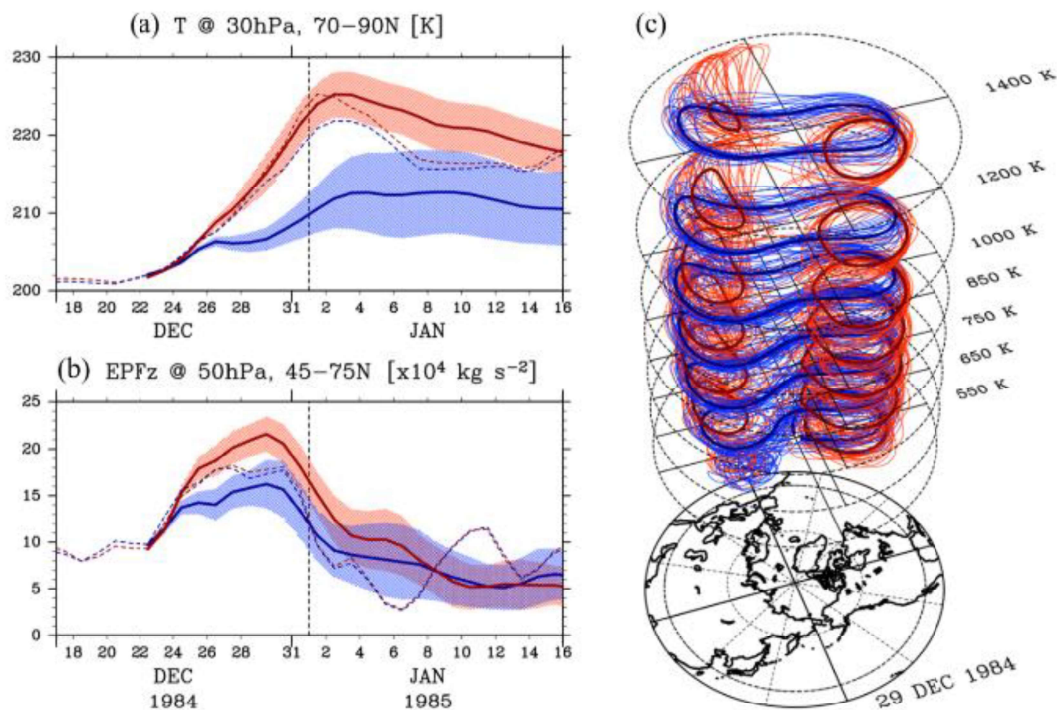


図 4. 衛星観測インパクトの顕著事例における場の概観. 1985 年 1 月 1 日に生じた SSW に対する, D-10 からのアンサンブル予報結果. JRA-55 開始の予報を赤線で, JRA-55C 開始の予報を青線で示す. (a) 30 hPa における北緯 70 度以北での領域平均温度および (b) 50 hPa における北緯 45 度から 75 度で領域平均した E-P フラックス鉛直成分の時系列. D-15 から D+15 までの期間について表示. 太線でアンサンブル平均, 陰影の幅でそこからのメンバー間標準偏差の半値を示す. また, 各再解析を破線で示す. (c) 予報開始 7 日目 (D-3) における成層圏周極渦の縁の等値線図. 下部成層圏から上部成層圏までの各等温位面 (550, 650, 750, 850, 1000, 1200, 1400 K) の図を重ねて, 3 次元的に極渦の形態を表示. 細線で各メンバー, 太線でアンサンブル平均の場について示す.

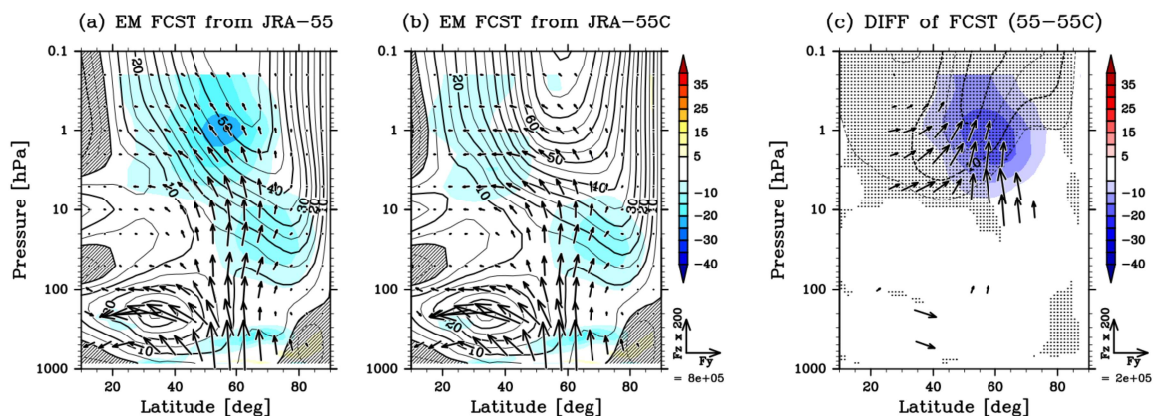


図 5. 衛星観測インパクトの顕著事例における予報開始直後の帯状平均場. (a) JRA-55 および (b) JRA-55C から開始した予報における, 東西風 (等値線, 間隔: 5 m s^{-1}) と E-P フラックス (矢印, 気圧の平方根に鉛直方向に規格化: $\text{kg s}^{-2} \text{ Pa}^{-0.5}$) およびその収束発散 (色, $\text{m s}^{-1} \text{ d}^{-1}$) の緯度-高度断面図. 予報開始 1-3 日目 (D-9 から D-7) で期間平均した, アンサンブル平均場を表示. (c) 両者の差 [(a) - (b)]. 東西風に関して, 差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 99% 以上) な領域を網掛けで示す. また, E-P フラックスに関しては, 東西南北成分ともに同様に有意と判定された差のみを 4 倍の大きさで表示.

なお、上記の予報開始直後の上空の差異を起点として、更なる差異の拡大が生じたことを、下部成層圏 (50 hPa) における E-P フラックス鉛直成分 (北緯 45 度から 75 度で平均) の時系列 (図 4b) において、確認することができる。12 月 25 日 (D-7) 以降、JRA-55 からの予報においては、波の増幅 (= 西風減速) による下層からの更なる波活動度の上方伝播という正のフィードバックが続くのに対し、JRA-55C からの予報においては、それが鈍化してしまい、両者の差異が拡大していた。このように、成層圏側の基本場状態によって対流圏からの波活動度フラックスが制御されることは、メカニスティックモデルによる数値実験 (Scott and Polvani 2004, 2006; Hitchcock and Haynes 2016) において指摘されてきているが、その好例を、衛星観測データの同化インパクトを探るためのアンサンブル予報実験という極めて実際の状況下で見出せたと言える。以上のように、この顕著事例においては、初期に存在した上部成層圏の差異が、波と基本場との相互作用のあり方を変えることにより、極渦が分裂するか否かという差にまで発達し、中長期予報にインパクトをもたらすことがあることを、実際に確認することができた。

4. まとめと議論

本研究では、JRA-55 および JRA-55C を初期値に用いたアンサンブル再予報実験を実施することで、衛星観測データの同化が、SSW の予測に及ぼすインパクトの調査を行った。これは、長期再解析の中でも特徴的な試みである「JRA-55 ファミリー」と気象研究所アンサンブル予報システム (MRI-EPS) とを組み合わせることによって実現した、多数 (20) 事例の SSW に対する観測システム実験であり、このような試みは他に類をみない。

まず、分かり易い形でインパクトを提示するために、衛星観測の有無によって SSW の生起判定に生じる差異について示した。大昇温の判定基準である北緯 60 度、10 hPa における帯状平均東西風の逆転を、正しいタイミング (前後 3 日のずれは許容) で予測できたメンバーの割合を比較した結果、JRA-55C からの予報 (衛星観測が無い場合) においては、SSW の生起 5 日前からの捕捉率が平均として 20% 程低下してしまうことが明らかとなった。この 5 日前というタイミングは、今回の再予報実験結果および多くの先行研究 (cf. Tripathi *et al.* 2015) において、SSW を決定論的に予測可能な下限となっているが、この結果は、それが衛星観測の恩恵を受けた良質な初期値によって担保されていることを示唆する。すなわち、もし衛星観測データが利用できない場合には、

(警報判断等に重要な) 現象生起の事前把握の「最低限ライン」が下がってしまうと言える。

ついで、対流圏における中長期予報の予測可能性の源として期待されている SSW 後の循環偏差の予測に対して、衛星観測の有無が及ぼす影響を調べた。北半球における高度場のアノマリー相関係数を比較した結果、概ねポジティブな衛星観測のインパクト (特に上部成層圏において顕著で 15% 以上の改善) がみられたが、同時に、両予報セット間の予報成績の差が有意であると判定される期間は、せいぜい予報開始直後の 5-10 日程であることも分かった。しかしながら、SSW 生起の 10 日以上前からの予報においては、SSW の生起/非生起と関係して、下部成層圏において長期にわたる予報成績の差異を生み出すような事例がいくつか存在することが分かった。このような事例依存性は、衛星観測による (主として上空の) 修正に対して、全ての SSW が感度を持つわけでもなく、また、そもそもの SSW 後の循環偏差が持続するか否かも事例依存性が大きいことを考えれば、当然の結果である。

そこで最後に顕著事例 (1985 年 1 月の SSW に対する 10 日前からの予報) において、衛星観測データの同化によって生み出された修正が、中長期予報にまで影響を及ぼす過程の詳細を確認した。衛星観測がないためにモデル上端付近で強風バイアスが顕在化していた JRA-55C からの予報では、予報開始直後の上部成層圏における E-P フラックス収束が妨げられることをきっかけとして、その後の波-平均流相互作用が抑制されていた。その結果、JRA-55 からの予報においてみられた極渦の分裂の再現に、JRA-55C からの予報は失敗してしまっていた。この差は、その後の下部成層圏における循環偏差の持続と絡んで、SSW 後 1 ヶ月にも及ぶ予報成績の差に繋がった。分裂型 SSW 直前の極渦はいわば臨界状態に近いため、微小な差異によっても遷移が生じると考えられる (e.g. Matthewman *et al.* 2011; Yasuda *et al.* 2017) が、衛星観測によって補填したモデルによる表現が不完全な変動 (e.g. 重力波) による基本場への寄与が、そのきっかけとなったものとして、この結果は捉えることができる。特に、Birner and Williams (2008) は、概念モデルでの SSW を模した遷移過程において、重力波を模したノイズが大きな影響を与えることを実演しているが、本研究は現実大気におけるそのような過程の詳細を描いたとも言える。

以上、高層観測の比較的豊富な北半球においても、衛星観測は SSW の生起・発達過程の把握・予測において、重要な役割を果たしており、衛星観測データの同化によるインパクトは決して小さくないことを明示することができた。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (16J09665, 特別研究員奨励費) の助成を受けたものである。作図には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Albers J.R., and T. Birner (2014), Vortex preconditioning due to planetary and gravity waves prior to sudden stratospheric warmings. *J. Atmos. Sci.*, **71**: 4028-4054. doi:10.1175/JAS-D-14-0026.1.
- Andrews, D., J. Holton, and C. Leovy (1987), *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press Inc., 489 pp.
- Baldwin, M. P. and Thompson, D. W.J. (2009), A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **135**: 1661-1672. doi:10.1002/qj.479.
- Birner, T., and P. D. Williams (2008), Sudden stratospheric warmings as noise-induced transitions. *J. Atmos. Sci.*, **65**(10), 3337-3343. doi: 10.1175/2008JAS2770.1.
- Bouttier, F., and G. Kelly (2001), Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **127**: 1469-1488. doi:10.1002/qj.49712757419.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani (2007), A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.*, **20**:3, 449-469. doi:10.1175/JCLI3996.1.
- de la Cámara, A., J. R. Albers, T. Birner, R. R. Garcia, P. Hitchcock, D. E. Kinnison, and A.K. Smith (2017), Sensitivity of sudden stratospheric warmings to previous stratospheric conditions. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 2857-2877, doi:10.1175/JAS-D-17-0136.1.
- Gerber, E. P., and P. Martineau (2018), Quantifying the variability of the annular modes: reanalysis uncertainty vs. sampling uncertainty. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 17099-17117, doi:10.5194/acp-18-17099-2018.
- Hitchcock, P., and P. Haynes (2016), Stratospheric control of planetary waves, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 11,884-11,892, doi:10.1002/2016GL071372.
- Ichimaru T, S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa (2016) Predictability changes of stratospheric circulations in northern hemisphere winter. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **94**: 7-24. doi:10.2151/jmsj.2016-001.
- Kalnay, E., Y. Ota, T. Miyoshi, and J. Liu (2012), A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters, *Tellus A*, **64**:1, 18462, doi:10.3402/tellusa.v64i0.18462.
- Karpechko, A. Y. (2018), Predictability of sudden stratospheric warmings in the ECMWF extended-range forecast system. *Mon. Wea. Rev.*, **146**(4), 1063-1075, doi:10.1175/MWR-D-17-0317.1.
- Kobayashi, C., and co-authors (2014), Preliminary Results of the JRA-55C, an Atmospheric Reanalysis Assimilating Conventional Observations Only. *SOLA*, **10**, 78-82. doi:10.2151/sola.2014-016.
- Kobayashi, S., and co-authors (2015) The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93** (1), 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Langland, R. H. and N. L. Baker (2004), Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus A*, **56**, 189-201 doi:10.1111/j.1600-0870.2004.00056.x
- Matthewman, N. J., and J. G. Esler (2011), Stratospheric sudden warmings as self-tuning resonances. Part I: Vortex splitting events, *J. Atmos. Sci.*, **68**(11), 2481-2504, doi:10.1175/JAS-D-11-07.1.
- Matthewman, N. J., J. G. Esler, A. J. Charlton-Perez, and L. M. Polvani (2009), A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure, *J. Clim.*, **22**(6), 1566-1585, doi:10.1175/2008JCLI2365.1.
- Mizuta, R., and co-authors (2012), Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **90A**, 233-258, doi:10.2151/jmsj.2012-A12.
- Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera (2017), Dynamics and predictability of downward-propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007. *J. Atmos. Sci.*, **74**(11), 3533-3550, doi:10.1175/JAS-D-16-0330.1.
- Noguchi, S., and C. Kobayashi (2018), On the reproducibility of the September 2002 vortex splitting event in the Antarctic stratosphere achieved without satellite observations. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **144**: 184-194. doi:10.1002/qj.3193.
- Noguchi, S., H. Mukougawa, Y. Kuroda, R. Mizuta, S. Yabu, and H. Yoshimura (2016), Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 3388-3404, doi: 10.1002/2015JD024581.
- Ota, Y., J. C. Derber, E. Kalnay, and T. Miyoshi (2013), Ensemble-based observation impact estimates using the NCEP GFS, *Tellus A*, **65**:1, 20038, doi:10.3402/tellusa.v65i0.20038.
- Scheffler, G., Pulido, M., and C. Rodas (2018), The role of gravity wave drag optimization in the splitting of the Antarctic vortex in the 2002 sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 6719-6725. doi:10.1029/2018GL077993.
- Scott, R. K., L. M. Polvani (2004), Stratospheric control of upward wave flux near the tropopause. *Geophys. Res. Lett.*, **31**: L02115. doi:10.1029/2003GL017965.
- Scott R. K., L. M. Polvani (2006), Internal variability of the winter stratosphere. Part I: Time-independent forcing. *J. Atmos. Sci.*, **63**: 2758-2776. doi:10.1175/JAS3797.1.
- Taguchi, M. (2016), Predictability of major stratospheric sudden warmings: Analysis results from JMA operational 1-month ensemble predictions from 2001/02 to 2012/13. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 789-806, doi:10.1175/JAS-D-15-0201.1.
- Taguchi M. (2017), Comparison of large-scale dynamical variability in the extratropical stratosphere among the JRA-55 family data sets: Impacts of assimilation of observational data in JRA-55 reanalysis data. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**: 11193-11207. doi:10.5194/acp-17-11193-2017.
- Toth, Z., and E. Kalnay (1993), Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **74**(12), 2317-2330, doi:10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.
- Tripathi, O. P., and co-authors (2015), The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **141**, 987-1003. doi:10.1002/qj.2432.
- Tripathi, O. P., and co-authors (2016), Examining the predictability of the stratospheric sudden warming of January 2013 using multiple NWP systems. *Mon. Wea. Rev.*, **144**(5), 1935-1960. doi:10.1175/MWR-D-15-0010.1.
- Yabu, S., R. Mizuta, H. Yoshimura, Y. Kuroda, and H. Mukougawa (2014), Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI - EPS) for climate research, *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, **71**, 63 pp.
- Yasuda, Y., F. Bouchet, and A. Venaille (2017), A new interpretation of vortex-split sudden stratospheric warmings in terms of equilibrium statistical mechanics. *J. Atmos. Sci.*, **74**(12), 3915-3936. doi:10.1175/JAS-D-17-0045.1.
- Zapotocny, T. H., J. A. Jung, J. F. Le Marshall, and R. E. Treadon, (2007), A two-season impact study of satellite and in situ data in the NCEP Global Data Assimilation System. *Wea. and Forecast.*, **22**(4), 887-909. doi:10.1175/WAF1025.1.